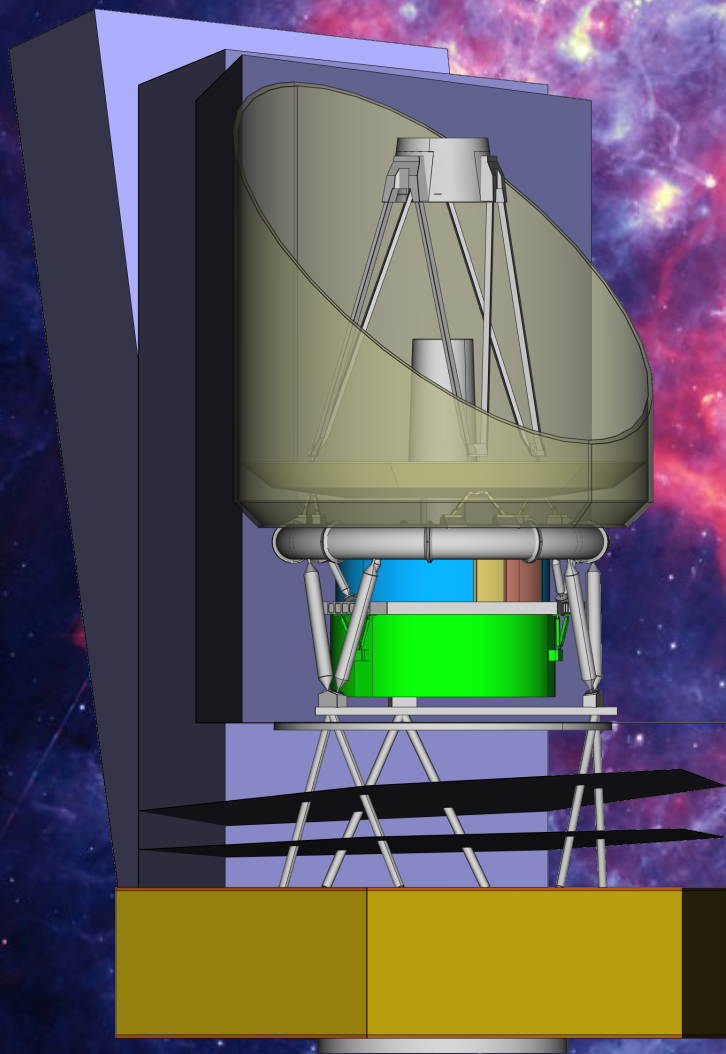


# SPICAの概要と期待された成果



山村 一誠(ISAS/JAXA)

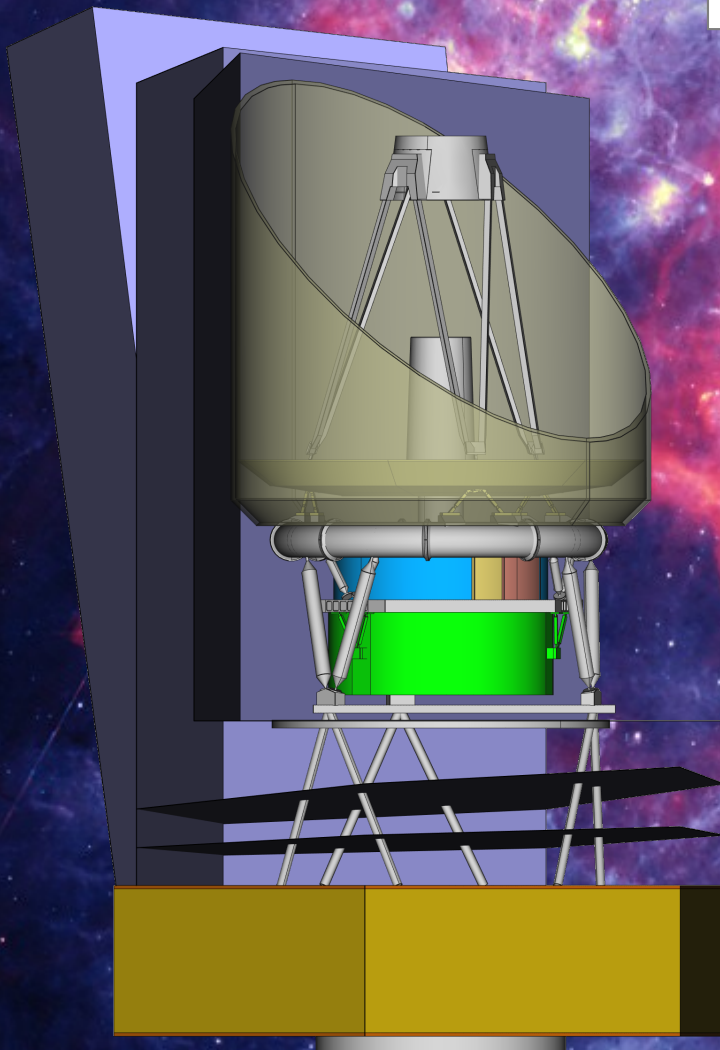
金田 英宏(名古屋大学&ISAS/JAXA)

SPICAチーム

# SPICA

## 計画概要

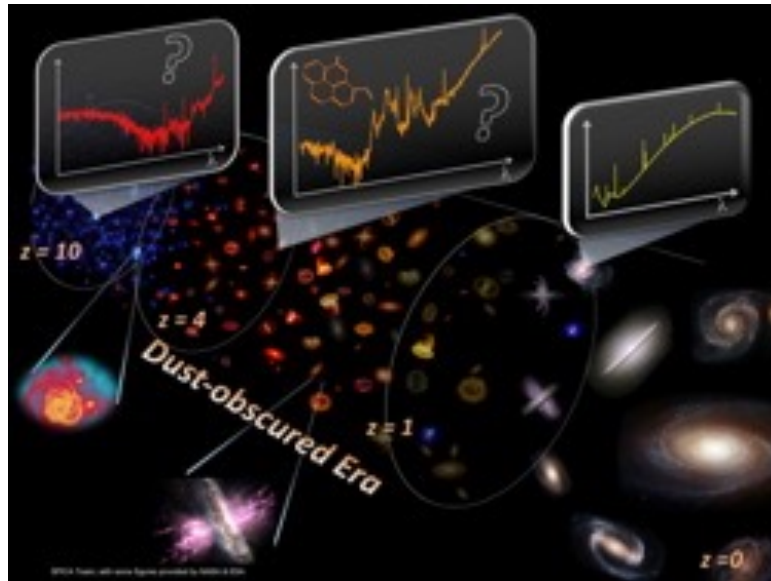
望遠鏡: 有効口径 2.5 m、8 K 以下に冷却  
波長範囲: 10 - 350  $\mu\text{m}$   
軌道: 太陽-地球系 L2 周り軌道  
打上: JAXA H3 ロケット  
打上年: 2020年代後期 (ESAとの協議事項)  
寿命: 5年 (無冷媒冷却)



### 日欧協力を軸とする 国際共同スペース天文台ミッション

日本: JAXA戦略的中型ミッション(300億円規模)  
欧州: ESA Cosmic Vision Mクラス(550M€以下)  
として概念検討実施

SPICAは、重元素と星間塵の生成に伴い、宇宙がより多様で豊かな世界になり、生命居住可能な惑星世界が生まれた過程を解明することを目指す。そのために、**大型の宇宙冷却望遠鏡**を搭載し、**超高感度赤外線観測**を実施する。

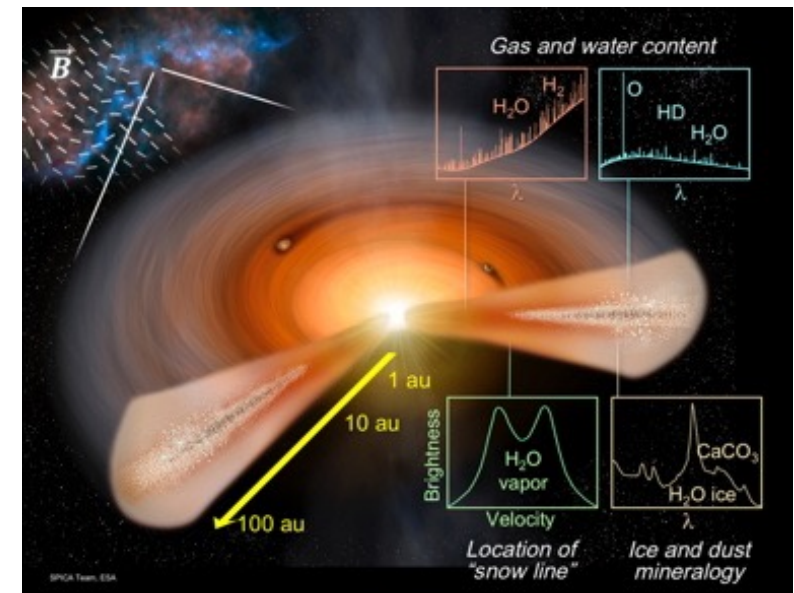


## ● 宇宙進化史の解明

- 宇宙がいかにして現在のような元素と物質に富む世界に至ったのか？
- 銀河と巨大ブラックホールの共進化の過程。

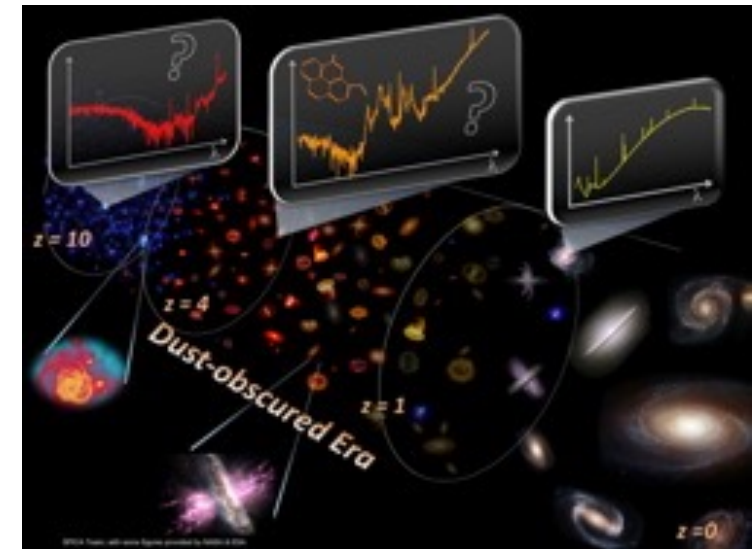
## ● 星・惑星系形成の解明

- 星形成の環境と過程の理解。
- 生命を育む地球のような惑星がどのように形成されたのか？

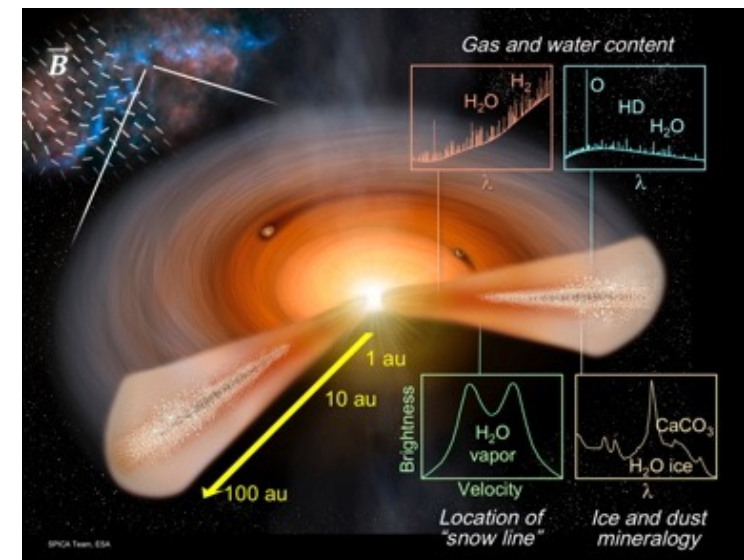




- The rise of metals and dust
  - 宇宙の最初期の銀河で炭素や酸素など、やがては生命現象にも重要となる**重元素**はどのように形成されたのか？**ダスト**や**有機物質**(芳香族炭化水素)はいつどのように形成されたのか？
  - 中間～遠赤外線分光観測により、130億年前の激しい星形成銀河やクエーサーからの**有機物質**や**ケイ酸塩ダスト**の初検出を目指す。
- Star formation and Black Hole accretion
  - 銀河の形成期に巨大ブラックホールは同時期に形成されたのか？
  - ブラックホールの活動が星形成を止めたのか？
  - SPICAでは、多量のダストの吸収の影響がない赤外線波長帯で重元素を含むガスの電離状態などから、120億年前の宇宙の激しい星形成銀河まで、**巨大ブラックホールの存在とその活動性**を明らかにする。



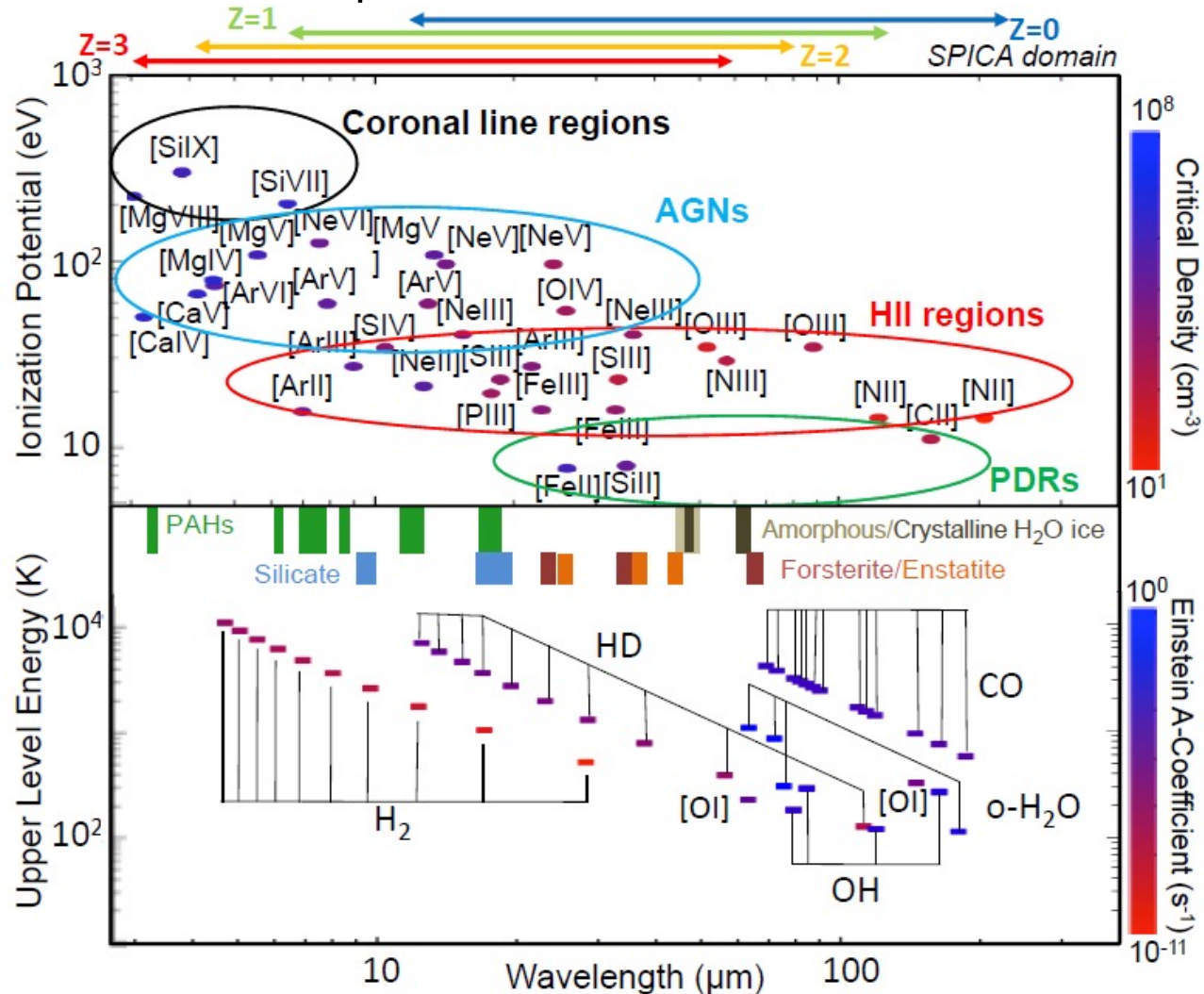
- Gas content during the planet forming phase
  - 原始惑星系円盤の100 K程度の**ガスの物理・化学状態と円盤の進化**に伴う変化を、多数の天体の分光観測から明らかにする。
- Setting the clock for planet formation
  - 円盤中の**ガスの散逸量**、ガスの速度を多数の天体において測定する。
- Water in planet formation
  - 円盤中の水の状態(気体、固体、結晶)の分布から、**スノーラインの位置を測定**する。さらに、星・円盤の活動によって水の状態がどのように影響を受けているかを明らかにする。
- From pristine dust to planets
  - 円盤中の固体物質が、**微粒子から惑星**に成長していく過程を測定する。また、生命につながる炭素質の物質の検出を目指す。



# SPICAの観測性能(観測波長域)



- 赤外線波長域の主要な Spectral Features と SPICA の観測波長域。



Upper: I.P. for key IR fine-structure lines (adapted from Spinoglio & Malkan, 1992).

Lower: excitation temperature of molecular transition, spectral features from PAHs, H<sub>2</sub>O ice, silicates.

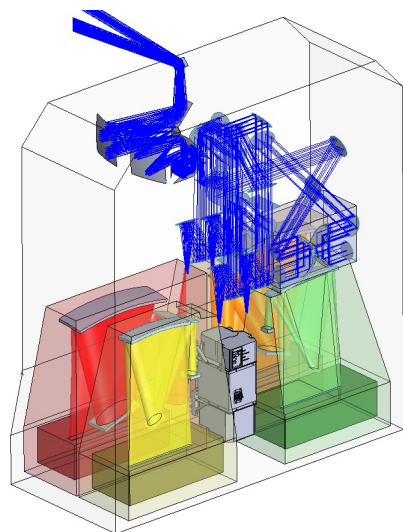
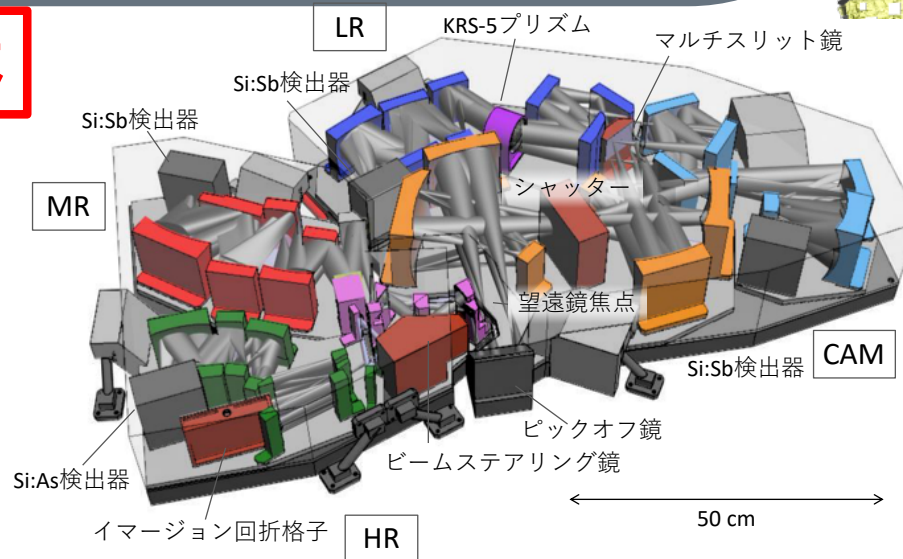


# 焦点面観測機器

**日本**

## SMI (SPICA Mid-Infrared Instrument)

- LR **R=50-150**, **Si:Sb** 17-36 $\mu$ m
- Camera **10'x12'**, **Si:Sb** @ 34 $\mu$ m
- MR **R=1300-2300**, **Si:Sb** 18-36 $\mu$ m
- HR **R=29000** **Si:As** 10-18 $\mu$ m (w/ Immersion Grating)



SAFARI/SPEC

## SAFARI (SpicA FAR-infrared Instrument)

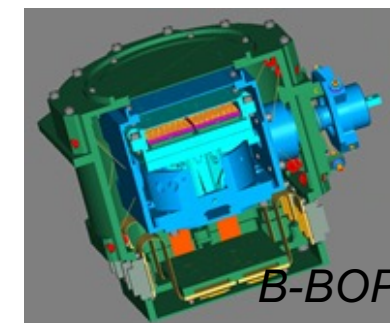
TES Bolometer Arrays operated at 50mK

- LR **R=300**, 34-230 $\mu$ m, grating
- HR **R=1500-11000** 34-230 $\mu$ m Grating+FTS

**欧州**

## B-BOP

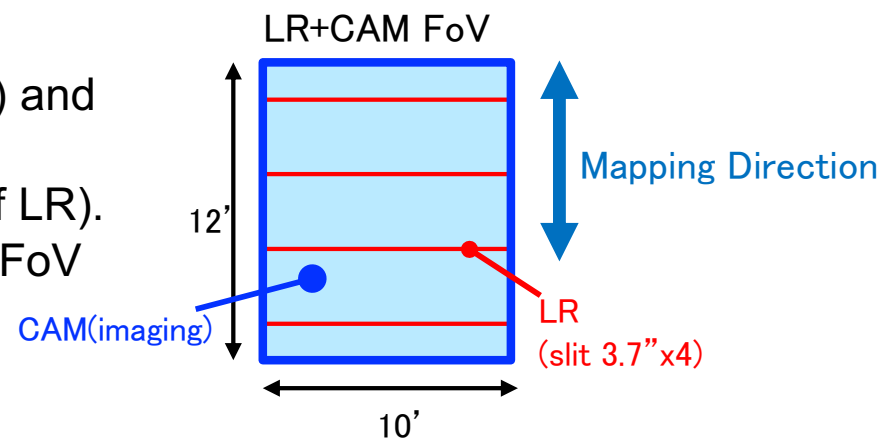
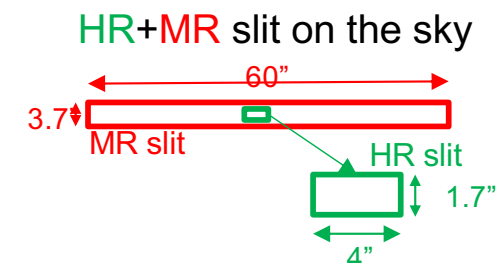
(B-fields with Bolometers and Polarizers)  
infrared **polarimetry** imager at 70, 200, 350 $\mu$ m



# SPICA Observing Modes (SMI & B-BOP)

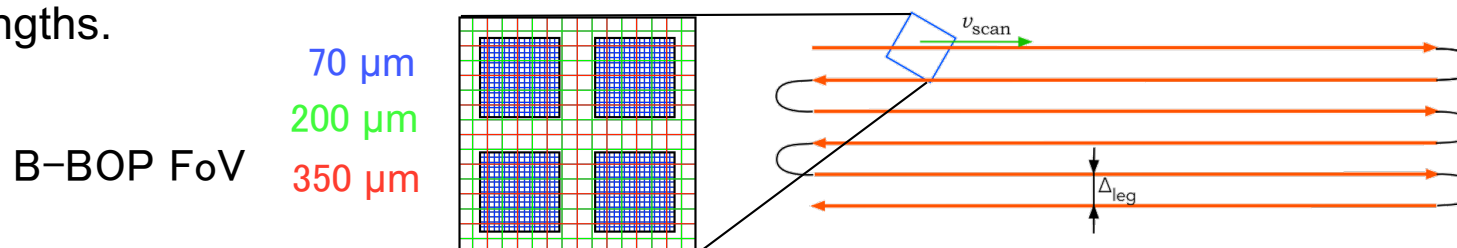
## ● SMI

- **HR+MR**: HR (High-resolution spectroscopy) and MR (Medium-resolution spectroscopy) channels observe the same position of the sky **simultaneously**.
- **LR+CAM**: LR (Low-resolution spectroscopy) and CAM (camera) channels are operated **simultaneously** (CAM works as slit-viewer of LR). Spectral mapping is realized by moving the FoV along the direction indicated in the figure.



## ● B-BOP

- Three channels (70, 200, 350  $\mu\text{m}$ ) are operated **simultaneously**.
- Approximately the same field-of-view (FoV) is covered by the three channels. Pixel size of each channel is defined to make **Nyquist sampling** of the PSF at the wavelengths.

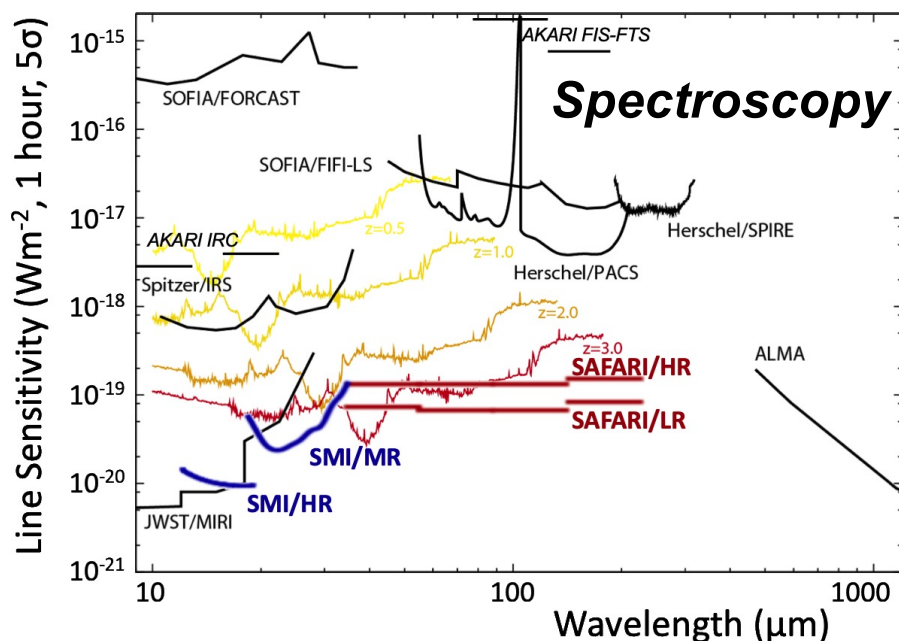
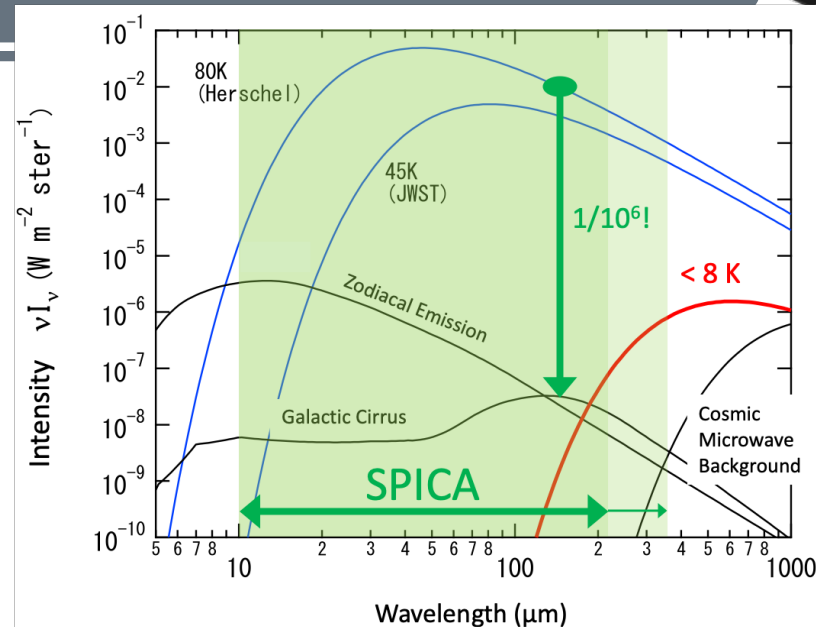






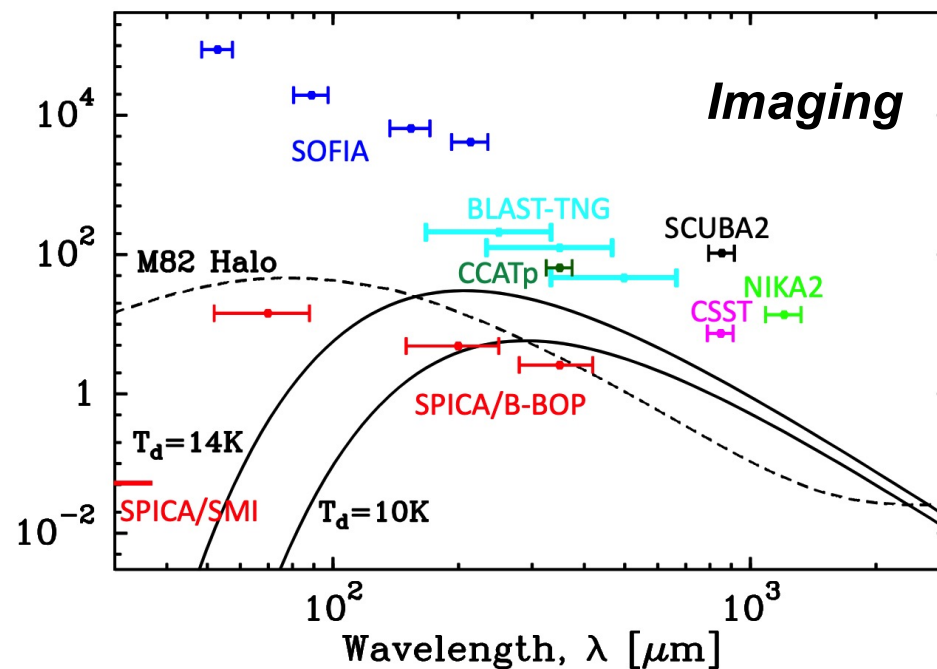
# SPICAの観測性能(感度)

冷却望遠鏡により、従来ミッションに対し大きな感度向上



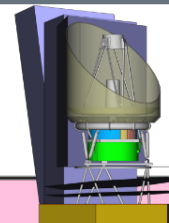
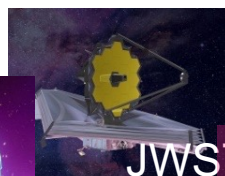
Continuous  $\lambda$  coverage

Surface Brightness,  $I_\nu$  [ $\text{MJy/sr}$ ]  
to map 5% Stokes Q, U at  $5\sigma$  in 1 hr/deg<sup>2</sup>





# 2030年代の観測天文学



冷たい  
ダスト  
とガス

「ダスト」  
||  
宇宙固体微粒子  
||  
炭素、酸素  
ケイ素、鉄

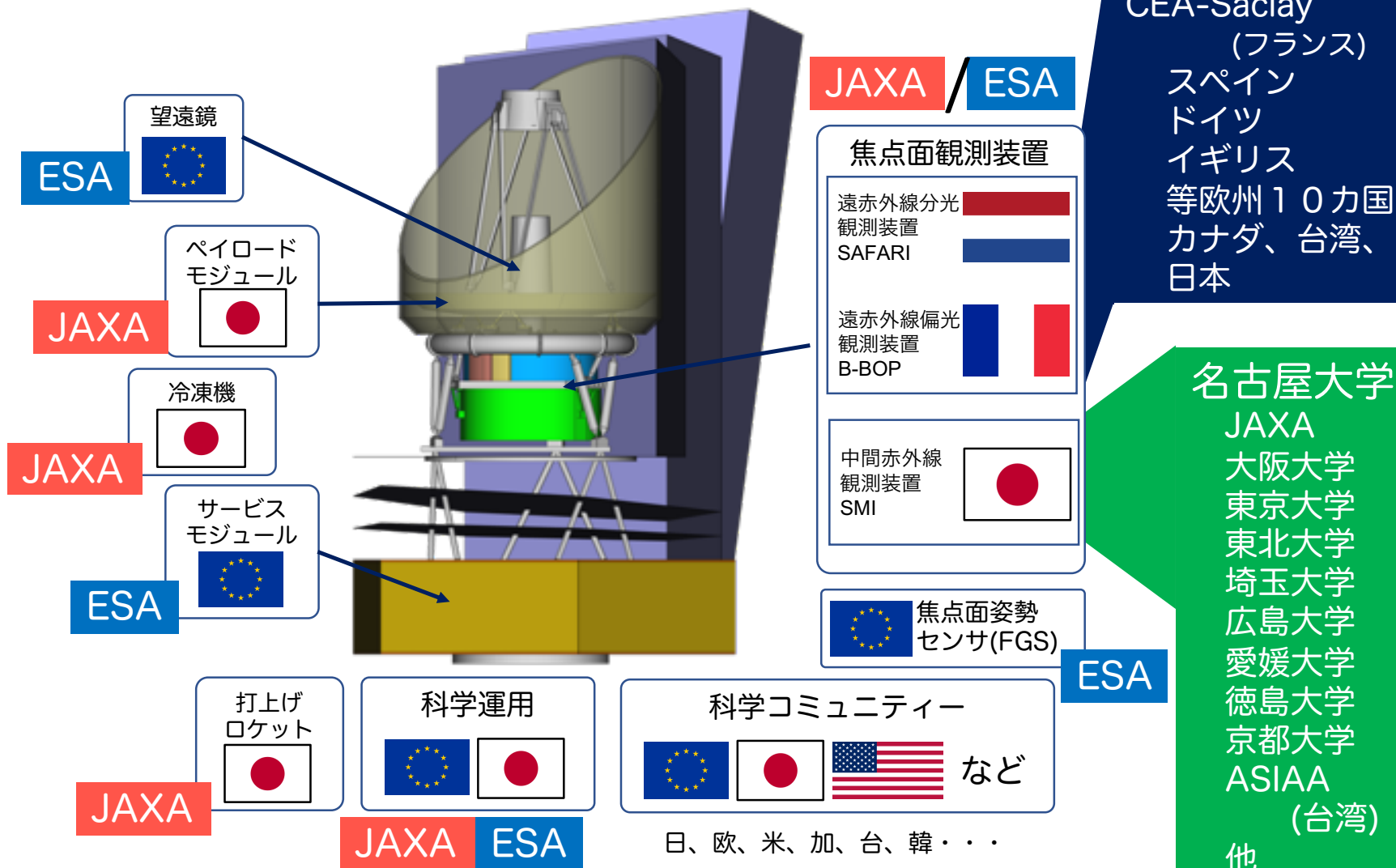
暖かい  
ダストとガス

星や惑星の誕生・進化の情報が得られるのは中間・遠赤外線

# 国際協力 役割分担

プロジェクト全体のとりまとめ  
欧州宇宙機関(ESA)

極低温冷却・打上げ  
JAXA





- SPICA Science Study Team (ESA)
  - 欧州6名、日本5名からなる。
  - より広い研究者による Science WG を組織して、科学検討。
  - MSRに向け、SPICAの科学的価値を記述した**Yellow Book**を作成(未完)。
  - Science WGの検討内容は、**White Papers** として出版(2022年3月現在13編)
  
- SPICA研究推進委員会 (JAXA)
  - 光赤外線、電波、太陽系、工学等幅広い分野の12名からなる。
  - 約70名の研究者からなる「サイエンス検討会」を組織、独自の検討を行った。
  - 「**サイエンス検討会最終報告書**」はSPICA HPより公開  
[https://www.ir.isas.jaxa.jp/SPICA/SPICA\\_HP/suishin/docs/SPICA\\_final\\_report\\_20201201.pdf](https://www.ir.isas.jaxa.jp/SPICA/SPICA_HP/suishin/docs/SPICA_final_report_20201201.pdf)
  - 天文月報「**SPICA特集**」2020年11月、12月号
  
- SPICAを通じて築かれた研究者のネットワークは、将来につながる貴重な財産となる。



- SPICAの科学検討の成果を、White Paperとして *Publications of the Astronomical Society of Australia (PASA)* から組織的に出版している。2022年3月現在で13編発行。右側の数字は被引用数。
- SPICA検討成果へのリファレンスとなるとともに、赤外線将来ミッション検討にも活用されることを期待。

ADS検索: [abs:\(SPICA\)](#) [bibstem:\(PASA\)](#)

<i>SPICA - a Large Cryogenic Infrared Space Telescope Unveiling the Obscured Universe</i> , Roelfsema, P. R. et al., PASA, 35, e048 (2018)	69
<i>Galaxy Evolution Studies with the SPace IR Telescope for Cosmology and Astrophysics (SPICA): The Power of IR Spectroscopy</i> , Spinoglio, L. et al., PASA, 34, e057 (2017)	31
<i>Feedback and Feeding in the Context of Galaxy Evolution with SPICA: Direct Characterisation of Molecular Outflows and Inflows</i> , González-Alfonso, E. et al., PASA, 34, e054 (2017)	17
<i>SPICA and the Chemical Evolution of Galaxies: The Rise of Metals and Dust</i> , Fernández-Ontiveros, J. A. et al., PASA, 34, e053 (2017)	17
<i>Tracing the Evolution of Dust Obscured Star Formation and Accretion Back to the Reionisation Epoch with SPICA</i> , Gruppioni, C. et al., PASA, 34, e055 (2017)	20
<i>Unbiased Large Spectroscopic Surveys of Galaxies Selected by SPICA Using Dust Bands</i> , Kaneda, H. et al., PASA, 34, e059 (2017)	16
<i>Probing the Baryon Cycle of Galaxies with SPICA Mid- and Far-Infrared Observations</i> , van der Tak, F. F. S. et al., PASA, 35, e002 (2018)	14
<i>Probing the high-redshift universe with SPICA: Toward the epoch of reionisation and beyond</i> , Egami, E., et al., PASA, 35, e048 (2018)	13
<i>Probing the cold magnetised Universe with SPICA-POL (B-BOP)</i> , Ph. André et al., PASA, 36, e029 (2019)	15
<i>Mid-IR cosmological spectrophotometric surveys from space: Measuring AGN and star formation at the Cosmic Noon with a SPICA-like mission</i> , Spinoglio, L. et al., PASA, 38, e021 (2021)	4
<i>The role of SPICA-like missions and the Origins Space Telescope in the quest for heavily obscured AGN and synergies with Athena</i> , Barchiesi, L., et al., PASA, 38, e033 (2021)	1
<i>The formation of planetary systems with SPICA</i> , Kamp, I., et al., PASA, 38, e055 (2021)	
<i>Simulating infrared spectro-photometric surveys with a SPRITZ</i> , Bisigello, L., et al., PASA, 38, e064 (2021)	



SPICA サイエンス検討会最終報告書より

- 塵に埋もれた活動的な超巨大ブラックホール探査
  - 銀河形成がピークを示す  $z=0.5-2$  の合体銀河を系統的に観測し、合体銀河中の塵の奥深くに埋もれた活動的な超巨大ブラックホール (AGN) の役割を観測的に正しく理解する。
- 原始銀河団探査
  - SMI を用いて、特に既知の原始銀河団を狙ったディープサーベイを行ない、初期宇宙における銀河、ブラックホールと「環境」の共進化について、本質的な理解を得る。
- 星間物質の進化
  - 特に宇宙誕生から数億年の宇宙初期における星間物質の性質を、SMIおよびSAFARIによる撮像・分光観測により明らかにする。
- 近傍銀河円盤内における星間ガスの状態
  - 高感度、高分解能分光観測により、星間ガスの物理・化学状態を決定し、それが星形成等の銀河活動とどのように関連しているかを理解する。高光度赤外線銀河での、星形成プロセスと、周辺環境への影響を通じて、銀河進化過程を解明する。
- 低金属量銀河
  - 近傍の低金属量 Blue Compact Dwarf 銀河内の超星団 (super star cluster) の星間物質の中に、大質量星を起源とするダストの痕跡を探し、初期宇宙の星間物質の化学進化過程の描像を得る

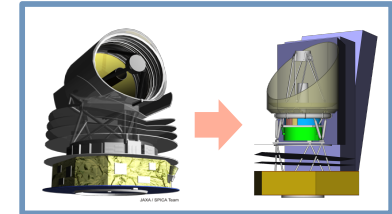


SPICA サイエンス検討会最終報告書より

- 分子雲の性質と星形成
  - B-BOP を用いた磁場構造観測により、さまざまな空間スケールと密度スケールにおけるガス・ダイナミクスにおける**磁場の寄与**を具体的に明らかにする。分子雲の中で重力的に不安定な**フィラメント状の高密度領域が形成される過程**を明らかにする。さらに分子コア・進化までの理解を進める。
- 原始星/惑星系円盤とそのエンベロープ
  - SAFARI を用いた分光観測により、原始星形成に伴う**化学進化の多様性**について、分子雲から円盤スケールまで繋ぐ理解の端緒を与える。
- 原始惑星系円盤
  - 中間赤外線水輝線高分散分光観測によって **H<sub>2</sub>O スノーライン**の位置を同定する
  - 円盤進化初期から散逸期までの**円盤質量分布・及びその散逸過程**を明らかにする。
  - 惑星形成領域における**複雑な有機分子**の生成過程や生命起源分子種との関連を明らかにする。
  - 水氷の観測から、惑星形成における様々な**水の役割**や、その熱史を観測的に検証する。
- 太陽系天体
  - 惑星・衛星大気分光観測から、生命の根幹となる**有機分子**の合成の場、および生命存在環境を守る場としての惑星大気を理解する。
  - 彗星核に含まれる氷および固体微粒子の観測から、**太陽系形成過程**に制限を加える。
- 系外惑星大気
  - 系外惑星大気の高分散分光観測により、大気の成分を同定し、惑星の形成場所を制約したり、現在大気中で起こっている光化学反応や大気の混合を調べたりすることができる。



- 2016/10 ESA Cosmic Vision M-class 5号機に提案。
- 2018/05 ESA CV M5候補として、提案25件から3件の一つに選定。日欧で本格的な検討開始。
- 2020/01 重量超過問題に対応するため望遠鏡を衛星本体に対して横置きから縦置きに変更。
- 2020/03-07 ESA M5 Mission Consolidation Review (MCR) 実施。技術的成立性と課題を確認。ESA Phase-A2 の活動開始。
- 2020/07/21 ESA側コストがM5の上限(550M€)を有意に超過していることが発覚。
- 2020/08 望遠鏡口径を1.8mに縮小して検討を継続することを決断。
- 2020/09/29 ISASミッション要求変更確認会を実施。口径を変更しても、ミッションの科学的価値は十分に高いことを確認。一方、所掌変更に伴う技術的・コスト的成立性に懸念が示され、ESAとの所掌に関する議論を所が主導して行うこととなった。
- 2020/10/02 ESA科学局長-ISAS所長会合で、ISAS提案の所掌案をESAが拒絶。
- 2020/10/07 M5検討取り下げ決定。
- 2021/06 ESA技術検討の最終報告。SPICAは衛星システムとして成立していたことを確認。







- SPICAの検討により、将来につながる**技術ヘリテージ**となる成果が得られている。
  - 放射冷却と冷凍機を用いた衛星搭載**無寒剤**極低温冷却系の、熱構造設計技術の習得
  - **極低温要素技術**開発
    - トラス分離機構の技術開発
    - 振動アイソレータの技術開発
  - **宇宙用冷凍機**の技術開発
    - 直線型第3熱交換器を使用したJT冷凍機
    - 冷凍機の低振動化、長寿命可の開発
  - **中間赤外線観測装置**の技術開発
    - 高感度赤外線検出器システム
    - 自由曲面を用いた光学設計
    - 高分散分光素子開発

将来の冷却ミッションへの適用

将来の衛星搭載赤外線観測機器への適用



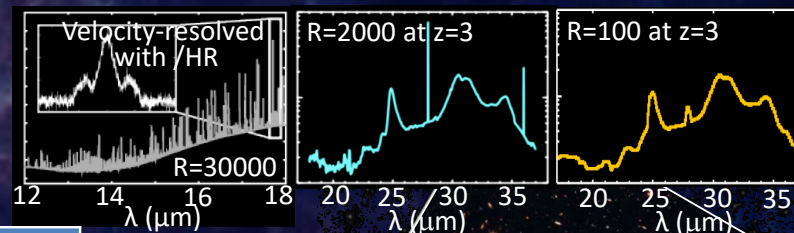
- SPICAは、宇宙進化史、星・惑星形成の解明を目指す赤外線天体物理学ミッションである。
- 中間・遠赤外線領域において、超高感度の分光・偏光観測を実現する。
- SPICAに期待するサイエンスの検討は、国際コミュニティはもちろんのこと、我が国でも70名以上が参加した「科学検討会」で進められ、学術論文や報告書としてまとめられている。
- 日欧共同でPhase A概念検討・設計、および科学検討を進めたが、ESA側コスト超過により、2020年10月にESA Cosmic Vision M5での検討を中止した。
- SPICAの計画中断により、中間・遠赤外線波長域の天文学は停滞することとなった。SPICAの目指したサイエンスを実現すべく、活動が進められている(金田氏講演)。

# 参考情報

# A.10 SMI Fact sheet

## SPICA / SMI Fact Sheet

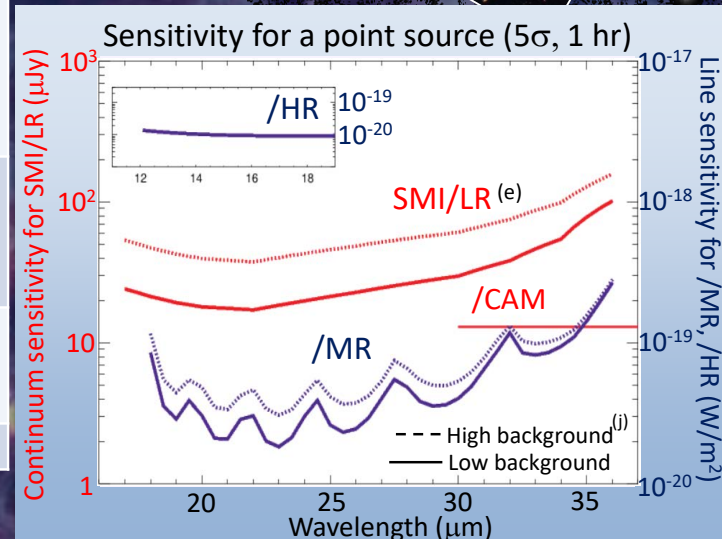
SPICA Mid-infrared Instrument (SMI) covers the wavelength range of 12–36  $\mu\text{m}$  with four channels: spectroscopy (SMI/LR, /MR, /HR) and imaging (/CAM).



Parameter	SMI /LR	/CAM Slit viewer for SMI /LR	/MR	/HR
Band centre - $\mu\text{m}$	27	34	27	15
Wavelength - $\mu\text{m}$	17 – 36	34	18 – 36	12 – 18 (a)
Spectral resolution R (diffuse source)	50 – 150 (b) (20 – 110)	5	1300 – 2300 (b) (1100-1400)	33000 (c)
Field of view	600" x 3.7"	600" x 720"	60" x 3.7"	4" x 1.7"
Band centre FWHM	4 slits 2.7"	3.5"	1 slit 2.7"	1 slit 2"
Pixel scale	0.7" x 0.7"	0.7" x 0.7"	0.7"	0.7"
Detector 1K x 1K	Si:Sb	Si:Sb	Si:Sb	Si:As
Point source sensitivity (5 $\sigma$ /1 hr) <sup>(d)</sup>				
Continuum - $\mu\text{Jy}$	25 (e)	13	280 (e)	1400 (e)
Line - $10^{-20}$ W/m <sup>2</sup> (f)	5		2.8	1.0
Survey speed - arcmin <sup>2</sup> /hr (g)	~28	~4500	~1.8	
Diffuse source sensitivity (5 $\sigma$ /1 hr) <sup>(d)(h)</sup>				
Continuum - MJy/sr	0.08	0.05		
Line - $10^{-10}$ W/m <sup>2</sup> /sr			1.0	0.8
Saturation limit – Jy	~20	~1	~1000	~20000

High-speed spectral mapping and wide-area survey with SMI/LR and /CAM

Spectral mapping with /MR



(a) continuous coverage up to 18.1  $\mu\text{m}$  + partial coverage for H<sub>2</sub>O 18.66  $\mu\text{m}$ .

(b)  $\lambda/\delta\lambda = 150$  (SMI/LR) and 1300 (/MR) at  $\lambda = 36 \mu\text{m}$ .

(c) designed for  $\lambda 20 \mu\text{m}$  diffraction limited PSF.

(d) sensitivity estimated with Fowler-16 sampling for SMI/LR and /CAM (0.5 Hz), and with ramp curve sampling for /MR (0.5 Hz) and /HR (1 Hz sampling).

(e) continuum sensitivity rescaled with R = 50, R = 1300, and R = 25000 for SMI/LR, /MR and /HR, respectively.

(f) sensitivity for an unresolved line.

(g) survey speed for the 5  $\sigma$  detection of a point source with the continuum flux of 100  $\mu\text{Jy}$  for SMI/LR at  $\lambda = 30 \mu\text{m}$  (/CAM at 34  $\mu\text{m}$ ) and the line flux of  $3 \times 10^{-19}$  W/m<sup>2</sup> for /MR at  $\lambda = 28 \mu\text{m}$ , both in the low background case with overheads of readout time included (32 sec/frame for SMI/LR and /CAM due to Fowler-16 sampling).

(h) sensitivity for a diffuse source in a 4" x 4" (SMI/LR, /MR) or 2" x 2" area (/HR).

(i) background levels are assumed to be 80 MJy/sr (High) and 15 MJy/sr (Low) at 25  $\mu\text{m}$ .

SMI Factsheet v12.1 - 01 July 2019



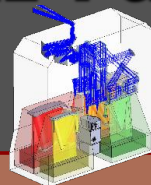
# A.8 SAFARI Fact sheet



## SPICA/SAFARI Fact Sheet

### SAFARI Overview

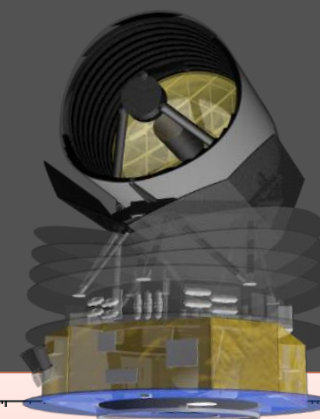
- Four band *grating spectrometer*
- Continuous spectroscopic capability from 34-230  $\mu\text{m}$



Parameter	Waveband				
	SW	MW	LW	LLW	
<b>Band centre / <math>\mu\text{m}</math></b>	45	72	115	185	
<b>Wavelength range / <math>\mu\text{m}</math></b>	34-56	54-89	87-143	140-230	
<b>Band centre beam FWHM</b>	4.5"	7.2"	12"	19"	
<b>Point source spectroscopy (5<math>\sigma</math>-1hr)</b>					
LR	<b>Limiting flux / <math>\times 10^{-20}</math> Wm<math>^{-2}</math></b>	7.2	6.6	6.6	8.2
	<b>Limiting flux density / mJy</b>	0.31	0.45	0.72	1.44
HR	<b>Limiting flux / <math>\times 10^{-20}</math> Wm<math>^{-2}</math></b>	13	13	13	15
	<b>Limiting flux density / mJy</b>	18	17	17	19
<b>Mapping spectroscopy* (5<math>\sigma</math>-1hr)</b>					
LR	<b>Limiting flux / <math>\times 10^{-20}</math> Wm<math>^{-2}</math></b>	84	49	30	23
	<b>Limiting flux density / mJy</b>	3.6	3.3	3.3	4.1
HR	<b>Limiting flux / <math>\times 10^{-20}</math> Wm<math>^{-2}</math></b>	189	113	73	51
	<b>Limiting flux density / mJy</b>	253	151	97	67
<b>Photometric mapping* (5<math>\sigma</math>-1hr)</b>					
	<b>Limiting flux density / <math>\mu\text{Jy}</math></b>	209	192	194	239
	<b>Confusion limit (5<math>\sigma</math>)</b>	15 $\mu\text{Jy}$	200 $\mu\text{Jy}$	2 mJy	10 mJy

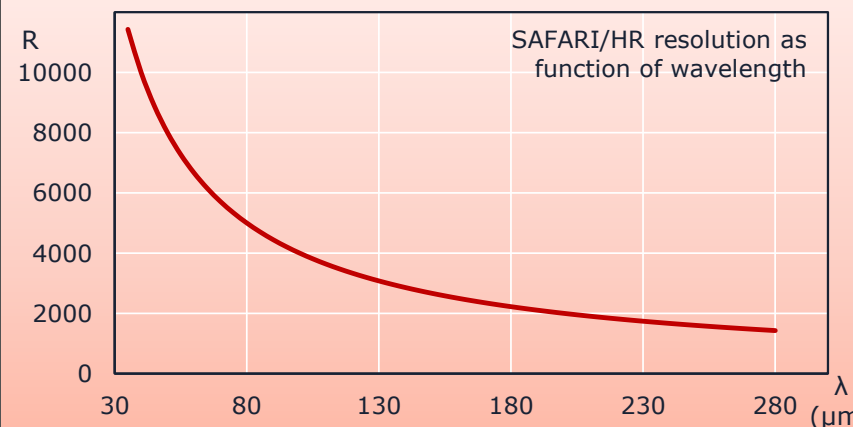
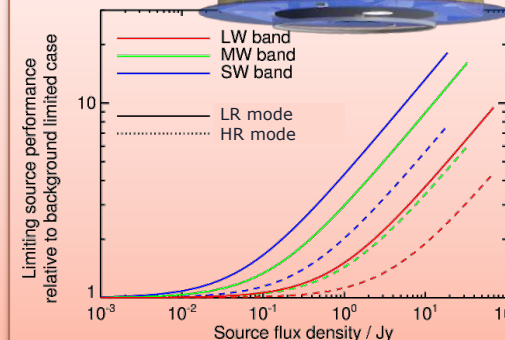
### SPICA Mission

- ESA/JAXA collaboration
- Telescope effective area 4.6 m $^2$
- Primary mirror temperature 8K
- Goal mission lifetime – 5 years



System performance v.s. target flux density, relative to the background limited case

- The sensitivity decrease is due to the increased photon noise from the target source
- Data given up to the instrument saturation limits for each band (31, 51 and 87 Jy for the SW, MW and LW bands respectively).



Sensitivities based on detector NEP  $2 \times 10^{-19}$  W/ $\sqrt{\text{Hz}}$   
 \* Mapping performance is for a reference area of 1 arcmin $^2$



# A.9 B-BOP Factsheet

## SPICA / B-BOP Fact Sheet

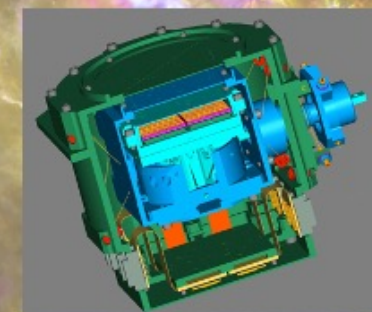
Polarimetric camera

Simultaneous observations in 3 bands over the range 50-420  $\mu\text{m}$

Mapping instrument delivering I, Q and U Stokes parameters

FoV from 1.8'x1.8' to 2.6'x2.6'

B-BOP fact sheet – v3.1 – July 2020



	Band 1	Band 2	Band 3
Band center	70 $\mu\text{m}$	200 $\mu\text{m}$	350 $\mu\text{m}$
Band edges	52–88 $\mu\text{m}$	135–225 $\mu\text{m}$	280–420 $\mu\text{m}$
# of pixels	4 x 16 x 16	16 x 16	8 x 8
Pixel size	3.5" x 3.5"	10" x 10"	20" x 20"
Band centre FWHM	5.5"	15.7"	27.5"
Astrophysical background surface brightness	4.75 MJy/sr	3.64 MJy/sr	1.87 MJy/sr
Point Source sensitivity (unpolarised)	0.20 mJy	0.57 mJy	1.06 mJy
Point Source sensitivity in Stokes (Q,U) at 5% polarization level	5.6 mJy	16.1 mJy	30.2 mJy
Surface brightness sensitivity (unpolarised)	0.17 MJy/sr	0.059 MJy/sr	0.030 MJy/sr
Sensitivity to map Stokes (Q,U) at 5% polarization level	4.8 MJy/sr	1.7 MJy/sr	0.86 MJy/sr

**Assumptions:**

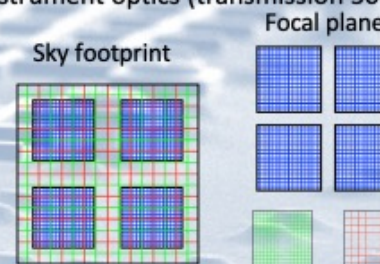
Detector NEP:  $3.10^{-18} \text{ W}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$

Telescope mirror temperature: 8 K

Mirror:  $\varnothing 2.5 \text{ m}$ , 17.3 % areal obscuration

Background includes:

- Zodiacal light, ISM, CIB, CMB at location typical of extragalactic observations
- Telescope
- Instrument optics (transmission 50%)



All sensitivities are for  $5\sigma$ , 10h mapping of a 1 square degree area

For polarization,  $5\sigma$  refers to the polarization fraction  $p$  ( $p/\sigma_p=5$ )

Only internal observation overheads included

Stray light and confusion limit not included